

侵食が進む岩盤斜面の安定性に関する実験的研究

| | | | |
|----------|-----|---|------------|
| 名城大学理工学部 | 正会員 | ○ | 清水泰弘 |
| 名古屋大学工学部 | 正会員 | | Ömer AYDAN |
| 名古屋大学工学部 | 正会員 | | 京谷孝史 |
| 名古屋大学工学部 | 正会員 | | 市川康明 |
| 名古屋大学工学部 | 正会員 | | 川本眺万 |

1. はじめに

岩盤斜面が海岸に面している場合、その岩盤斜面は波浪、凍結、日射、塩類、乾湿、化学反応など化学的風化作用や物理的風化作用を受ける。化学的風化作用によって岩盤内の強度が低下し、物理的風化作用によって幾何学的安定性が失われる。特に岩盤斜面の海岸に接する斜面法尻付近がこれらの風化を受けやすい場所であり、侵食作用による不安定現象によって自然発性的な崩壊が起こり、平坦地が少ない海岸近傍の開発に伴う人工的な要因も加わって思わぬ重大な事故が生ずることがある。

今回の報告は、底面摩擦模型実験装置により物理的風化作用を受け、幾何学的に不安定状態になった不連続性岩盤斜面の侵食深さと斜面崩壊との関係を明らかにし、さらに、これらの破壊形状を調べ不連続岩盤斜面に見られる破壊様式の分類と同様な分類の可能性について考察した。また、最近起こった岩盤斜面崩壊事例を示し、その現場の調査結果を基に模型実験を行い破壊過程を調べてみた。

2. 実験方法

2. 1 底面摩擦模型実験装置

底面摩擦模型実験装置を図-1に、この装置の原理を図-2に示す。この装置の原理は、一定方向に一定速度(0.15cm/sec)で作動するプラスチックベルト上に模型を置き、固定枠(鋼製のフレーム)でベルト上の模型の動きを止めることで模型とベルトとの間に摩擦力を発生させる。この摩擦力によって生じた模型内の応力分布が、重力場における応力状態と相似となるように実験するものである。

2. 2 模型材料および実験方法

本実験で使用した模型材料は、硫酸バリウム($BaSO_4$)、酸化亜鉛(ZnO)、白色ワセリンを70:21:9の重量比で配合したものである。この材料の強度は単位体積重量に大きく依存しているため、締め固めの程度により模型の強度を比較的簡単に変化させることが出来る。また、化学反応を起こす事がなく、繰り返し使用できる利点もある。今回使用した模型材料の単位体積重量と一軸圧縮強度および締め固め圧力との関係を図-3に示す。また、表-1と表-2に締め固め圧力300kPa(3kg/cm²)での力学特性およびこの材料で作った不連続面の力学特性を示す。

模型斜面を成形する方法は、大きさが25x30x40mmの型枠を用いて、所定の締め固め圧の時厚さが25mmになるように模型材料の量を調節してプレス装置によって圧縮し、実験装置のベルト上に成層角度にあわせて並べ、所定の斜面角度になるように成形した。なお、ブロック状のものは長さ50mmの型枠で成形し層状と同様に並べ成形した。

成層角度、斜面角度および模型形状(層状、ブロック状)と侵食深さの関係を調べる実験には、締め固め圧が3kgf/cm²の模型材料を使用した。実際の岩盤斜面の崩壊をシミュレートした実験では、風化した岩盤にその地質特性より締め固め圧を0.6kgf/cm²のものを使用し、その他の岩盤には、それぞれの地質特性より締め固め圧を3kgf/cm²および2kgf/cm²の模型材料を使用した。

実験は、底面摩擦模型実験装置のベルト上で固定枠に接して斜面を成形し、斜面法尻部を高さ25mmで侵食深さを増加させ、それぞれの破壊線が斜面上部に達して全体破壊が生ずるまで実験を行なった。実験のケー

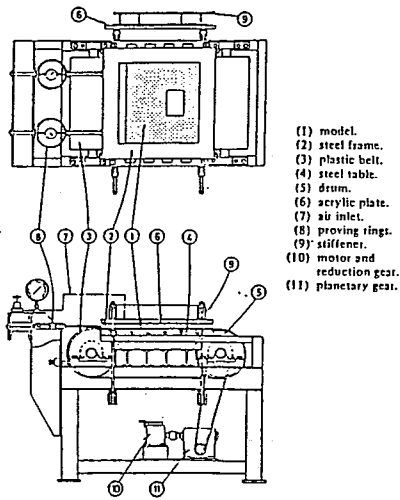


図-1 底面摩擦模型実験装置

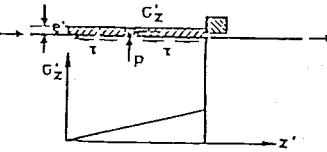
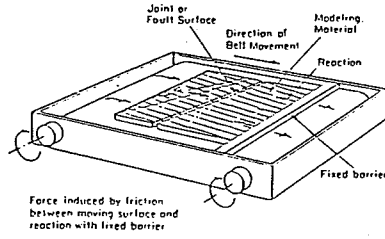


図-2 底面摩擦模型実験の原理

表-1 模型材料の力学特性

| c (kPa) | σ_c (kPa) | σ_t (kPa) | ϕ ($^\circ$) | γ (kN/m 3) |
|------------|---------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| 9.44 | 31.6 | 12.4 | 28 | 17.21 |

表-2 不連続面の力学特性

| c_d (kPa) | ϕ_d ($^\circ$) |
|----------------|--------------------------|
| 0 | 40~43 |

- c : 粘着力
- σ_c : 一軸圧縮強度
- σ_t : 引張り強度
- ϕ : 摩擦角
- γ : 単位体積重量
- c_d : 不連続面の粘着力
- ϕ_d : 不連続面の摩擦角

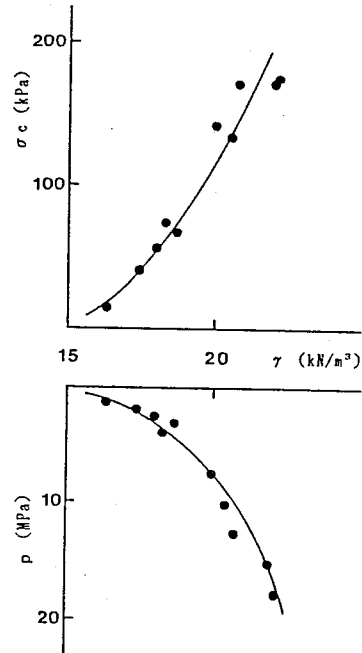


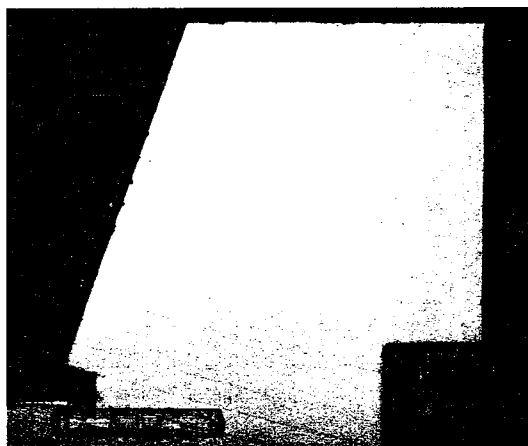
図-3 単位体積重量と一軸圧縮強度および締め固め圧力の関係

スは、初期斜面角度を70°と90°とし、成層角度を15°から165°の間で8種類、成層状態が層状とブロック状の2種類について行った。また、進展する破壊形状を記録するため一定時間間隔で写真撮影を行なった。

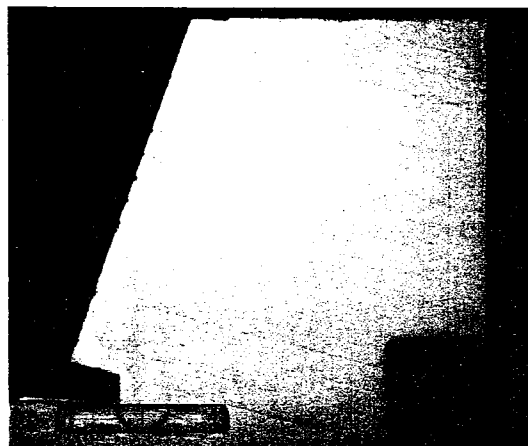
3. 実験結果および考察

層状およびブロック状について成層角度の違いによる崩壊形状の例を写真-1と写真-2に示す。写真-1には、層状のケースの破壊過程を示す。侵食深さがそれぞれ1.0d, 2.0d, 3.0d, 4.0d (dは侵食深さ)の状態のものである。侵食深さが2.0dまでは、局部破壊に止まっていたが3.0dをこえると全体破壊に発展した。

写真-2(a)~(b)には、斜面角度70°,成層角度165°のブロック状のケースの破壊過程を示す。侵食深さを1.0d, 4.0d, 5.0d, 6.0dと深くした場合の破壊状況を示しており、4.0dでは侵食部の上部の局部破壊が発生しており、侵食が進につれ支えを無くしたブロックから順次落下し、8.0dでは斜面最上部にまで達する全体破壊が発生した。



(a)



(b)

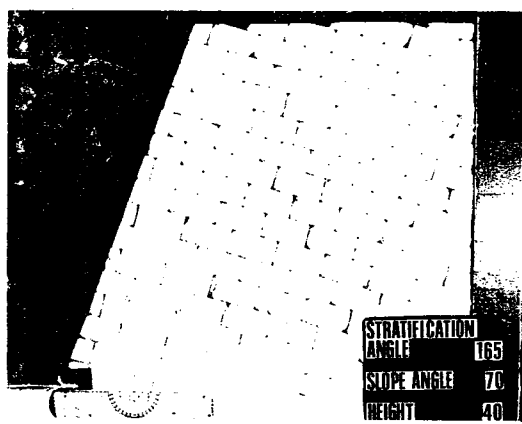


(c)

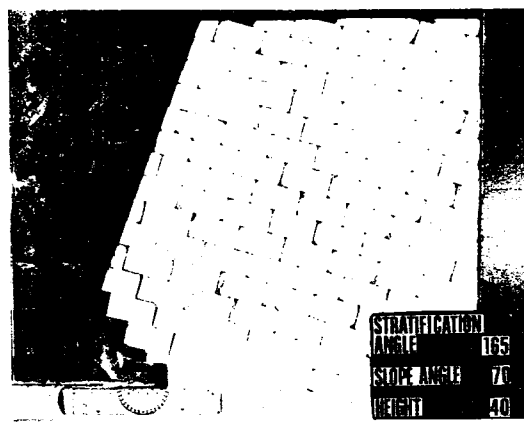


(d)

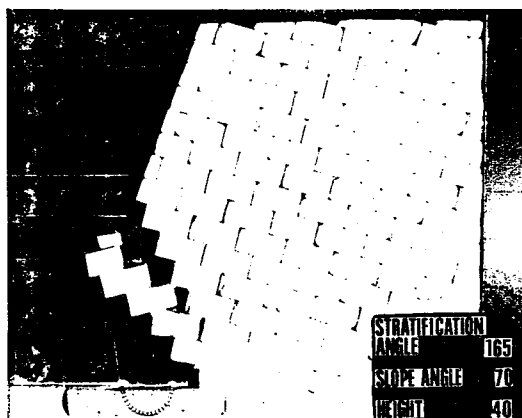
写真-1 層状モデルによる破壊形状



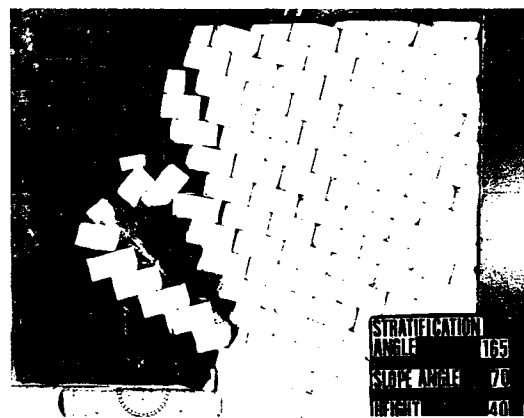
(a)



(b)



(c)



(d)

写真-2 ブロック状モデルによる破壊形状

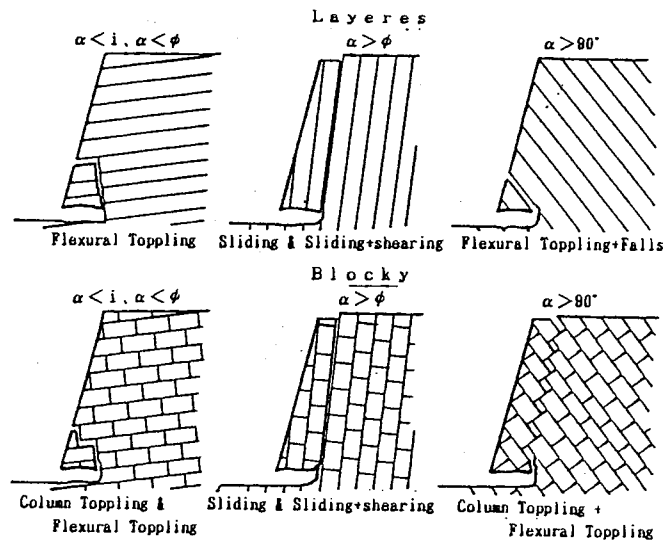


図-4 法尻侵食による岩盤破壊様式

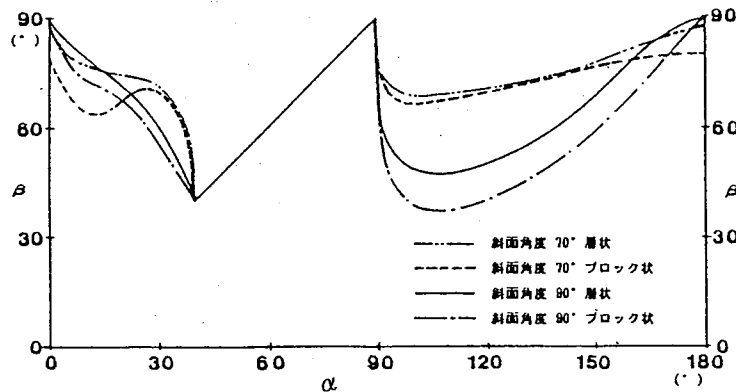


図-5 成層角と全体破壊時の斜面破壊角の関係

法尻侵食によって生ずる岩盤斜面崩壊の破壊様式を分類すると図-4のようである。この図は、層状とブロック状および成層角度 (α) と内部摩擦角 (ϕ) で区別して示している。模型実験による斜面破壊で出来た破壊線の角度を成層角度によって整理すると図-5のようになる。この図は、横軸に成層角度 (α)、縦軸に破壊によって出来た新しい斜面角度 (β) を取り、初期斜面角度の 70° と 90° および層状とブロック状に分けて示した。この図を全体的に見ると初期斜面角度の 70° より 90° の方が新しくできる斜面の角度が小さく、さらにそれぞれの初期斜面角度で層状よりブロック状の方が小さな破壊角度になる事が明らかとなった。

破壊様式の領域を層状とブロック状に分けて分類すると図-6の様である。この図は、横軸に成層角度 (α)、縦軸に初期斜面角度 (i) を取り破壊様式および安定領域と不安定領域を示した。岩盤斜面崩壊には地質構造や幾何学的形状によって異なる破壊様式を示すことは知られているが、法尻侵食による不安定現象によっても同様に各種の破壊様式に分類できるものと考えられる。

4. 岩盤斜面崩壊事例

4.1 現場調査結果

海岸線近くで生じたある岩盤斜面崩壊は、高さ30m、厚さ5m、崩壊重量は2600tの規模であった。現場は、1500万年前の新第三紀中新生と呼ばれる時代の比較的新しい地層で、岩としては中程度の固さである。崩壊場所の地層は、地盤が凝灰岩で下層から凝灰質礫岩、粒子の大きい凝灰質砂岩、粒子の小さな凝灰質砂岩であ

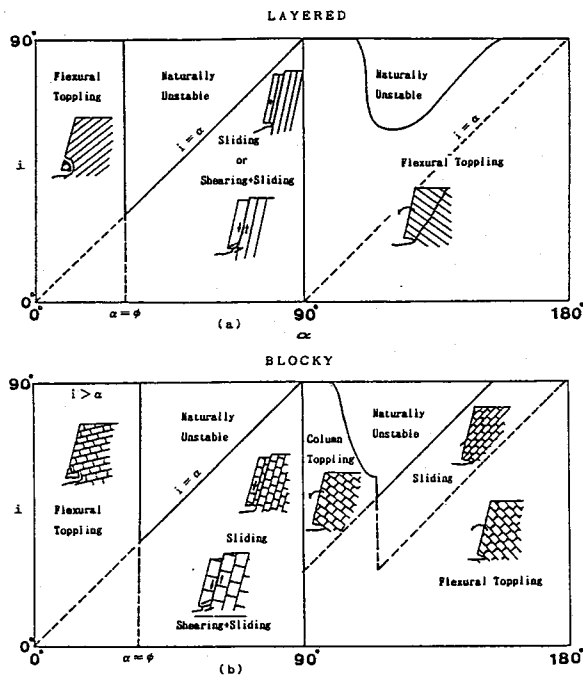


図-6 法尻侵食による岩盤破壊様式の領域分類

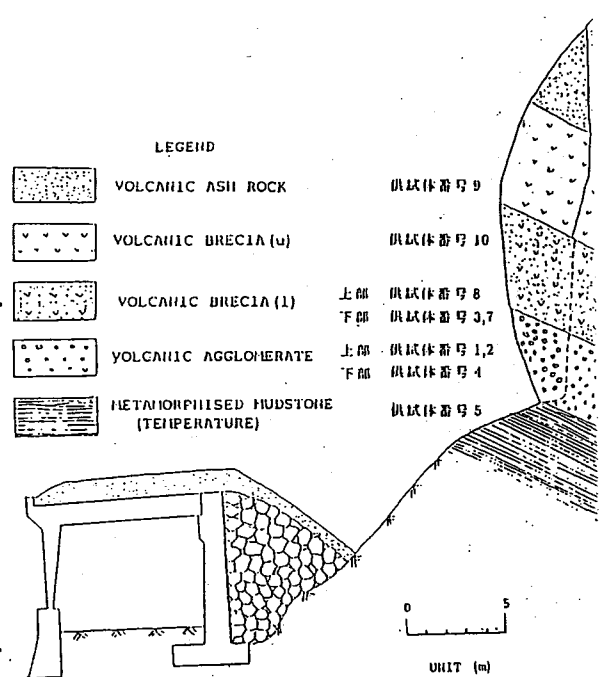


図-7 岩盤斜面崩壊現場の断面図

る。現場において採取できた岩石の引張強度は、下層からそれぞれ115kgf/cm²、27kgf/cm²、30kgf/cm²、60kgf/cm²であった。しかしこれらは乾燥状態での試験結果であり、含水比が高くなるとその引張強度は1/2から1/3に減少することが確認されている。この斜面の地質構造は、成層面が受け盤状でその角度は約150°（ベース面より反時計方向に計測した）、崩壊後の斜面角度は約85°であった。また、粒子の小さい凝灰質砂岩においては崩壊後斜面の表面に風化の後が確認された。崩壊現場の断面図を図-7に示す。

以上の様な調査データよりこの岩盤斜面崩壊について次のようにまとめることができる。成層面が受け盤である事から、斜面の全体に節理のほとんど無いものであればたわみ性トプリング破壊、節理の多いものであればトプリング破壊が考えられる。結局、最下層の凝灰質礫岩が風化によって強度が低下して支えを無くし、それより上部の粒子のあらい凝灰質砂岩が引張破壊を含むような形で破壊し、たわみ性トプリング破壊を起したものと考えられる。

4. 2 崩壊事例の模型実験

この岩盤斜面崩壊の事例をシミュレートし底面摩擦模型実験装置で実験を行なった。まず最初に、締め固め圧300kgfの材料のみで図-8（ケース1）に示すようなシミュレーションモデルを作り不連続面を第3層

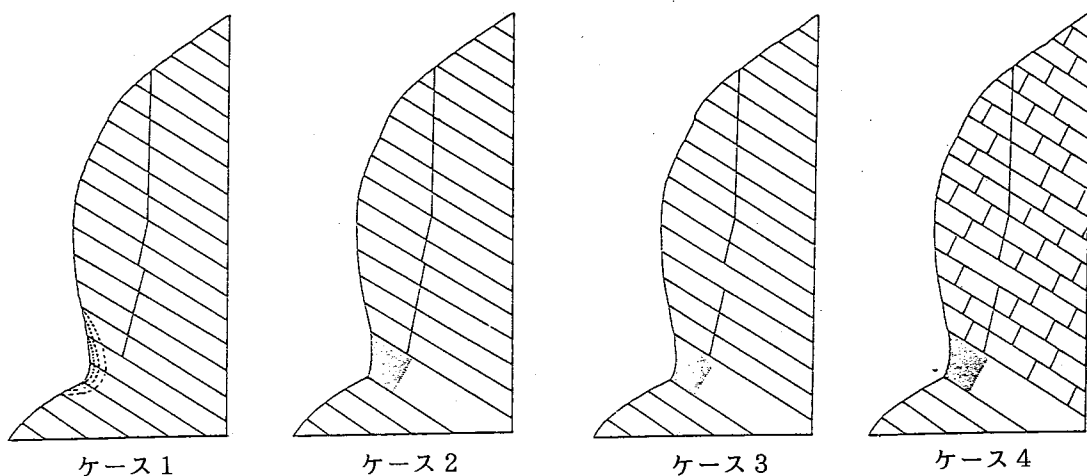


図-8 岩盤斜面崩壊現場の模型形状

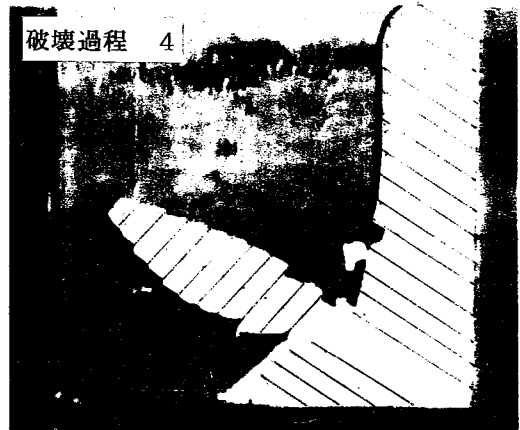
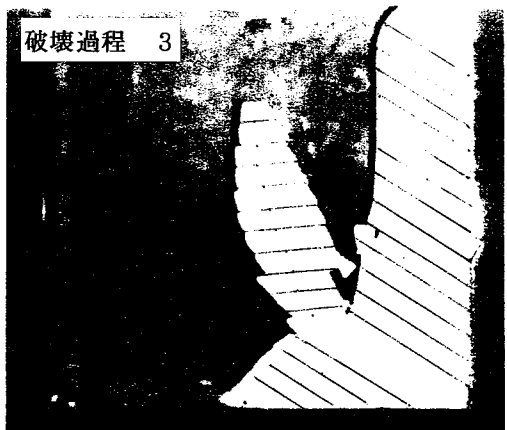
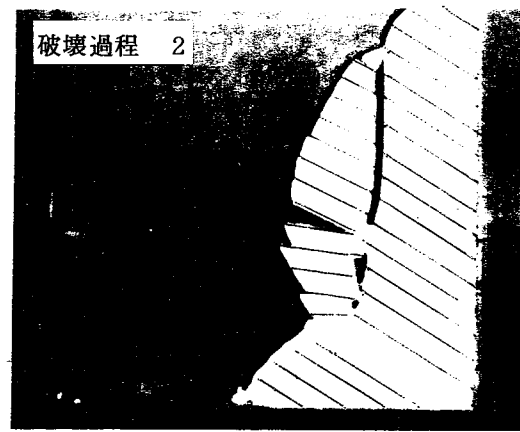
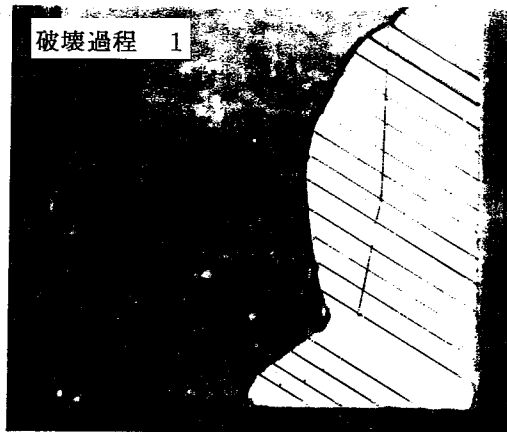


写真-3 岩盤斜面崩壊現場をシミュレートした模型実験の崩壊過程

まで入れて実験したところ、トップリング破壊にはいたらなかった。そこで、不連続面の状態はそのままにして第2層の一部に風化が進んでいたと考えて、この部分を60kgfで締め固めその他の部分は、地質特性に応じて締め固め圧300kgfと200kgfで締め固めたモデル(ケース2)で実験を行なった。その結果、せん断破壊のみ起こりトップリング破壊は起こらなかった。

次に、風化の状態はそのままにして第3層に入っている不連続面の上部部を無くし、崩壊し無かった岩盤と連続させたモデル(ケース3)で実験した。その結果、第3層部分が切れると同時に風化部分が潰れ、その後その潰れた部分を中心にしてトップリング破壊が起こった。その破壊過程を示すと写真-3のようである。また、破壊状況を詳しく知るために崩壊する部分に縦に不連続面を入れ、その他の条件はケース3と同様なモデル(ケース4)にして実験を行なった。その結果、第3層の連続部分が切れると同時に風化部分が崩れ、その後崩壊する岩盤の上部は海側に倒れ、その他の部分は不連続面の空隙を広げながらトップリング破壊を起こした。

以上の結果、崩壊した岩盤と同様の地質状態および強度特性を有してトップリング破壊を起こすためにはケース3と4の実験で示したような不連続面の状態および岩盤の風化が影響しているものと考えられる。また、今回の岩盤斜面崩壊は、ケース3や4の様に崩壊したものと推定される。

5. まとめ

岩盤斜面の法尻侵食による不安定現象によって生ずる斜面崩壊について、その破壊形状および破壊様式について底面摩擦模型実験装置を用いて調べた。その結果、法尻侵食などの不安定現象が原因で生ずる岩盤斜面崩壊の破壊様式も一般的な岩盤斜面崩壊と同様な領域別に分類ができるものと考えられる。また、岩盤斜面崩壊事例をシミュレートして模型実験を行なったところ、その破壊過程を十分に再現することができた。